

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika Instituut

Sander Alvin Kelder

**SIDUSTUMISEFEKTIIVSUSE EKSPERIMENTAALNE JA
TEOREETILINE MÄÄRAMINE ERITÜÜBILISTE OPTILISTE
KIUDUDE ÜHENDAMISEL**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:

Heli Lukner
Andreas Valdmann

Tartu 2016

Infoleht

Käesolevas bakalaureusetöös "*Sidustumisefektiivsuse eksperimentaalne ja teoreetiline määramine eritüübiliste optiliste kiudude ühendamisel*" uuritakse sidustumisefektiivsust valguse levimisel astmelise murdumisnäitajaga kiust nii astmelise murdumisnäitajaga kiudu kui ka footon-kristallkiudu. Lisaks kiust kiudu sidustamisele uuritakse ka kommertsiaalsete ühenduste ning parabolpeeglitest koosneva süsteemi rakendatavust ja efektiivsust valguse sidustamiseks. Töö CERCS kood on P200 (Elektromagnetism, optika, akustika).

Märksõnad: sidustumisefektiivsus, astmelise murdumisnäitajaga optiline kiud, SIF, footon-kristallkiud, PCF, kommertsiaalne ühendus, parabolpeegel.

The bachelor thesis "*Experimental and theoretical determination of coupling efficiency when connecting optical fibers of different types*" studies the coupling efficiency when coupling light from a step index fiber (SIF) to a SIF and to a photonic crystal fiber (PCF). In addition to fiber-to-fiber butt coupling, usability of commercial mating sleeve for connectorized fibers and collimating light emerging from the fiber and refocusing with pair of parabolic off-axis mirrors has been tested. The CERCS code of this thesis is P200 (Electromagnetism, optics, acoustics).

Keywords: coupling efficiency, step-index optical fiber, SIF, photonic crystal fiber, PCF, mating sleeve, parabolic reflector.

Sisukord

Infoleht	2
1 Sissejuhatus	4
2 Valdkonna ülevaade	6
2.1 Valguse levimine astmelise murdumisnäitajaga kius	6
2.2 Footonkristallid	9
2.3 Valguse sidustumine	11
2.4 Erinevad kaod kiudude ühendamisel	12
2.5 Optiliste kiudude ühendamine	14
3 Footonkristallkiu kirjeldamine	15
3.1 Footonkristallist väljuv kiirus	15
3.2 Footonkristalli valguse intensiivsuse mõõtmine kaugväljas	16
3.3 Footonkristalli iseloomustavate parameetrite määramine kaugvälja intensiivsuspildst	18
4 Valguse sidustumine	20
4.1 Valguse sidustumine laserist ühemoodilisse kiudu	20
4.2 Valguse sidustumine ühemoodilisest kiust ühemoodilisse kiudu	21
4.3 Valguse sidustamine ühemoodilisest SI kiust footonkristallkiudu	23
4.4 Kommertsiaalsed ühendused (<i>Mating Sleeves</i>)	24
4.5 Valguse sidustumine paraboolpeeglitest koosneva süsteemi abil	25
5 Tulemuste analüüs ja järeldused	26
Kokkuvõte	28
Summary	30
Kirjandus	32
Lihtlitsents	34

1 Sissejuhatus

Viimase 50 aasta jooksul on pooljuhid mänginud suurt rolli üldises tehnoloogia arengus. Soov miniaturiseerida tehnikat on tööle pannud mitmed teadlaste põlvkonnad. Paraku põhjustab vooluringide miniaturiseerimine ka suurema takistuse juhtides ja seeläbi ka suurema võimsuskao. Selleks, et kiirendada tehnoloogia progressi, on teadlased pööranud pilgu valguse kui informatsioonikandja poole.

Valgusel on mitmeid eeliseid võrreldes elektrivooluga info edasi kandmise mõttes. Näiteks dielektriliste materjalide ribalaius on suurusjärgudes 10^6 THz, samal ajal kui elektroonilistel süsteemidel jääb ribalaius suurusjärku 200 kHz [1]. See fakt viitab asjaolule, et valgus on suuteline kandma rohkem informatsiooni ajaühikus kui elektrivool.

Alates 1970. aastatest on kasutatud valgust kui informatsioonikandjat astmelise murdumisnäitajaga optilistes kiududes. Astmelise murdumisnäitajaga optilistes kiududes on valguse peegeldumisel täidetud täieliku sisepeegelduse tingimus, st et valguse peegeldumisel võimsuskadusid praktiliselt ei esine. Valguse neeldumine sõltub peaaesjalikult kasutatava klaasi kvaliteedist. Kui 1960. aastatel suudeti valmistada klaasi, kus valgus oli suuteline levima kõigest paari meetri kaugusele, nii et tema intensiivsus vähenes poole võrra, siis tänapäeval on see näitaja mõõdetav juba kilomeetrites. Valguse neeldumiskoeffitsendi drastiline vähenemine viimasel aastakümnetel võimaldab optilise signaali võimendajaid paigutada hõredamalt kui elektrilise kommunikatsioonisüsteemi korral. [2]

Astmelise murdumisnäitajaga kiududel on ka mitmeid puudusi. Näiteks põhjustab astmelise murdumisnäitajaga kiu painutamine suure valguskaod, mille põhjuseks on täieliku sisepeegeldumise tingimuse rikkumine leviva valguse jaoks.

Lisaks astmelise murdumisnäitajaga kiududele osatakse kaasajal valmistada ka muud tüüpi optilisi kiude, näiteks footonkristallkiude. Valguse levimine footonkristallkiududes ei ole selektav enam valguse täieliku sisepeegeldumisega. Uudne valguse lõksustamismehhanism footonkristallkiududes saavutatakse lainejuhi perioodilise murdumisnäitaja jaotusega. Lisaks on footonkristallkiududel ka mitmeid omadusi, mida astmelise murdumisnäitaja abil saavutada ei ole võimalik. Näiteks, eelpoolmainitud valguskaod footonkristallkiu painutamisel on väiksemad kui astmelise murdumisnäitajaga ühemoodilistel kiududel. Tehnoloogia areng viimastel aastakümnetel võimaldab toota footonkristallkiude juba tööstuslikult ning paigutab seeläbi footonkristallkiudude uurimise veel terasemalt teadlaste fookusesse. [1, 3]

Optilisi kiude on tihti tarvis omavahel ühendada. Ühendamist on näiteks vaja siis, kui maapinnas asuv optiline kiud on ehitustööde käigus poolitatud. Optiliste kiudude läbimõõt on lähedane juuksekarva läbimõõduga, milleks on ligikaudu 100 mikromeetrit. Seejuures, valgust kannab optilises kius edasi kõigest keskel paiknev südamik, mille läbimõõt jääb ühemoodilistel kiududel reeglina 5 mikroni lähedusesse. Nii peenikeste struktuuride, nagu optiliste kiudude südamikud seda on, kohakuti ja paralleelselt seadmine mitte-laboratoorsetes tingimustes ja vastava eritehnikata on suur väljakutse.

TÜ füüsikalise optika laboris on footonkristallkiud labori põhilise mõõteseadme – ruumilis-spektraalse SEA TADPOLE tüüpi interferomeetri [4] – oluliseks komponendiks. Valguse levimisel optilisest kiust SEA TADPOLE seadme footonkristallkiudu esinevad alati mõningad valguskaod. Suurust, mida kasutatakse valguskadude väljendamiseks, nimetatakse sidustumis-efektiivsuseks (*coupling efficiency*). See suurus näitab, kui suur osa ühes kius leviva valguse võimsusest kandub teise kiudu.

Käesoleva töö peamine eesmärk on uurida teoreetiliselt ja eksperimentaalselt sidustumisefektiivsust valguse levimisel vabas ruumis ühest kiust teise. Sidustumisefektiivsuse juures pöörame tähelepanu maksimaalsele saavutatavale väärtusele ning samuti uurime sidustumisefektiivsuse sõltuvust kiudude otste vahekaugusest ja omavahelisest asetusest. Töös uuritakse sidustumis-efektiivsust valguse levimisel astmelise murdumisnäitajaga kiust samatüübilisse astmelise murdumisnäitajaga kiudu ning samuti sidustumisefektiivsust valguse levimisel astmelise murdumisnäitajaga kiust footonkristallkiudu. Samuti otsime töö raames vastust küsimusele, kuidas korratavalt, kiiresti ja efektiivselt valgust ühest kiust teise sidustada ehk uurime ka kommertsiaalsete ühenduste ning parabolpeeglitest koosneva süsteemi rakendatavust ja efektiivsust uuritavate kiudude korral.

2 Valdkonna ülevaade

Selles peatükis teeme ülevaate valguse levimisest erinevates valguskiududes. On olemas erinevaid optilisi kiude: telekommunikatsioonirakendustes kasutakse peamiselt ühemoodilisi astmelise murdumisnäitajaga (SI) kiude, meditsiinilises endoskoopias kasutakse mitmemoodilisi SI kiude ning footonkristallkiude (PC kiud) kasutatakse kiudlaserites ja võimendites, kuna õõnsa südamikuga PC kiud võimaldavad suuri võimsusi edasi kanda [3]. Lisaks on olemas veel pidevalt muutuva murdumisnäitajaga optilised kiud (*graded index fibers*), mis on raskemini toodetavad kui SI kiud ning mida selles töös ei uurita. Peatükkides 2.1, 2.2 ja 2.4 refereerime allikat [2].

2.1 Valguse levimine astmelise murdumisnäitajaga kius

Kõige lihtsam matemaatiliseks kirjeldamiseks on astmelise murdumisnäitajaga optiline kiud. Taoline kiud on järgmise murdumisnäitaja jaotusega:

$$\begin{cases} n(r) = n_1 & \text{südamik, } 0 < r < a \\ n(r) = n_2 & \text{kestas, } r > a \end{cases} \quad (2.1)$$

kus

r - kaugus kiu sümmeetriateljest

a - südamiku läbimõõt

Kusjuures täieliku sisepeegelduse tingimuse rahuldamiseks peab olema täidetud tingimus $n_1 > n_2$. Reaalsetes rakendust leidvates kiududes $n_1 \simeq n_2$. Näiteks ühemoodilisel Corning SMF-28 optilisel kiul on $n_1 = 1.4667$ ja $n_2 = 1.4624$ lainepikkuse $\lambda = 1310\text{nm}$ juures [5]. See lähendus võimaldab optilise kiu iseloomustamiseks kasutada nn. nõrgalt juhtivat lähendust. Nõrgalt juhtivas lähenduses on kius leviva elektromagnetvälja z -telje suunalised komponendid \vec{H}_z , \vec{E}_z amplituudid tühised võrreldes muude komponentidega. Samuti rahuldavad nõrgalt juhtivas lähenduses elektrivälja ristkomponendid \vec{E}_x ja \vec{E}_y skalaarset lainevõrrandit

$$\nabla^2 \vec{\Psi} = \epsilon_0 \mu_0 n^2 \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2}. \quad (2.2)$$

Tuues sisse silindrilised koordinaadid, on murdumisnäitaja sõltuvus kujul $n^2 = n^2(r, \phi)$ ja elektrivälja x või y komponendi saame kirja panna järgmiselt:

$$\vec{\Psi}(r, \phi, z, t) = \vec{\psi}(r, \phi) e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (2.3)$$

kus

$\vec{\psi}$ - elektriväli

β - levikonstant (*propagation constant*), mis näitab kui kiiresti muutub faas z telje suunas

$\vec{\psi}(r, \phi)$ - elektriväli, mis sõltub koordinaatidest r ja ϕ

Kuna lainejuht omab silindrilist sümmeetriat, võime kasutada muutujate eraldamise meetodit ja $\vec{\psi}(r, \phi)$ kirja panna kujul:

$$\vec{\psi}(r, \phi) = R(r)\Phi(\phi) \quad (2.4)$$

Teostades mõningad matemaatilised manipulatsioonid, saame lõpptulemusena otsitavaks EM-välja radiaalosa $R(r)$ rahuldavaks võrrandiks:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + [(k_0^2 n^2(r) - \beta^2) r^2 - l^2] R = 0, l \in \mathbb{N} \quad (2.5)$$

Kui võrrandis **2.5** on $n^2(r)$ monotoonselt kahanev väärtuseni $n^2(a)$ ja sealt edasi konstantne, siis võib lahendid võrrandile **2.5** jagada kahte klassi:

(a)

$$k_0^2 n_1^2 > \beta^2 > k_0^2 n_2^2 \quad (2.6)$$

Kui β^2 rahuldab tingimust **2.6**, siis $R(r)$ on ostsillatoorne südamikus ja sumbuva kesta ning lubatud β -de hulk on loenduv. Selliseid elektromagnetvälju nimetatakse levivateks moodideks (*guided modes*). Fikseeritud l väärtuse jaoks eksisteerib mitu levivat moodi. Sellist levivat moodi tähistatakse sümboliga LP_{lm} (LP - lineaarselt polariseeritud).

(b)

$$\beta^2 < k_0^2 n_2^2 \quad (2.7)$$

Kui β^2 rahuldab tingimust **2.7**, siis $R(r)$ on ostsillatoorne nii südamikus kui ka kesta ja lubatud β -de väärtused kuuluvad kontiinumide võimsusega hulka. Selliseid elektromagnetvälju nimetatakse kiirguvateks moodideks (*radiation modes*). Kiirguvad moodid ei püsi kius ning seega ei läbi kilomeetrite pikkuseid vahemaid ega kanna signaali väljundisse.

Levivad- ja kiirguvad moodid moodustavad täieliku baasfunktsioonide hulga - see tähendab, et suvalise kius leviva elektromagnetvälja saab ritta arendada nende moodide kaudu järgmiselt:

$$\psi(r, \phi, z) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} c_{lm} \psi_{lm}(r, \phi) e^{-i\beta_{lm} z} + \int_0^{\infty} c(\beta) \psi_{\beta}(r, \phi) e^{-i\beta z} d\beta \quad (2.8)$$

Lubatud moodide analüütiline kuju astmelise murdumisnäitajaga kiu jaoks

Pannes kirja võrrandi **2.5** astmelise murdumisnäitajaga kiu jaoks saame:

$$\begin{cases} r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \left(U^2 \frac{r^2}{a^2} - l^2 \right) R = 0 & \text{südamikus } 0 < r < a, \\ r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - \left(W^2 \frac{r^2}{a^2} + l^2 \right) R = 0 & \text{kesta } r > a \end{cases} \quad (2.9)$$

kus $U = a\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$ ja $W = a\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}$.

Siinkohal on mõistlik ka välja tuua dimesioonitu suurus V , mida nimetatakse lainejuhi parameetriks ning mis on väga kasulik suurus lainejuhtide kirjeldamiseks. Kasulikkus väljendub selles, et

parameeter V võimaldab määrata, kas optiline kiud on ühe- või mitmemoodiline ning seda uurime järgmises peatükis.

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{U^2 + W^2} \quad (2.10)$$

Mõlemad võrrandid **2.9** on ära tuntavad kui Besseli võrrandid. Lahendid võrrandile **2.9** avalduvad järgmiselt:

$$\psi(r, \phi) = \begin{cases} \frac{A}{J_l(U)} J_l\left(\frac{Ur}{a}\right) \begin{pmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{pmatrix} & 0 < r < a \\ \frac{A}{K_l(W)} K_l\left(\frac{Wr}{a}\right) \begin{pmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{pmatrix} & r > a \end{cases} \quad (2.11)$$

Kus

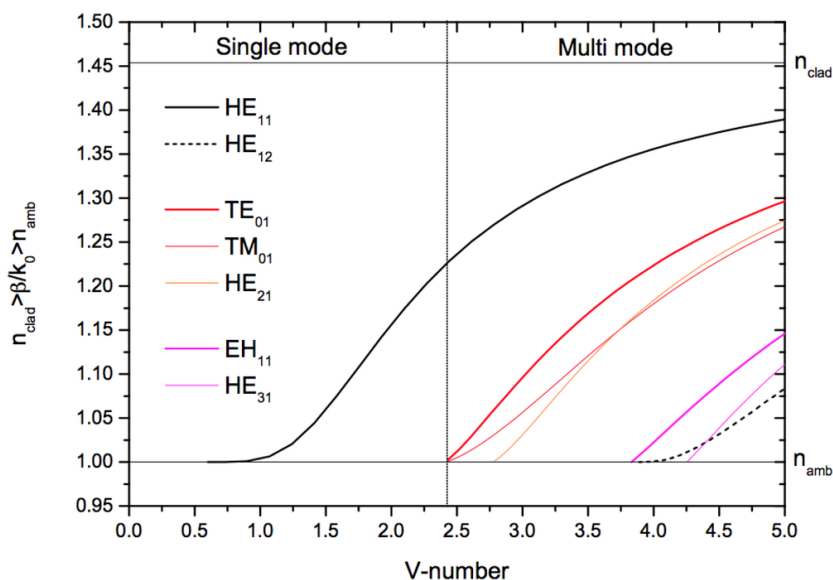
$J_l\left(\frac{Ur}{a}\right)$ - esimest tüüpi Besseli funktsioon

$K_l\left(\frac{Wr}{a}\right)$ - teist tüüpi modifitseeritud Besseli funktsioon

$\begin{pmatrix} \cos(l\phi) \\ \sin(l\phi) \end{pmatrix}$ - kirjaviis, kus kehtib ülemine või alumine avaldis samaaegselt südamikuga ja kesta lahendi jaoks

Kius eksisteerivad moodid fikseeritud lainejuhi parameetri V jaoks

Nõudes EM-välja **2.11** ja tema tuletise $\frac{d}{dr}$ pidevust kohas $r = a$, saame lõpptulemusena mitteamalüütilised lahendid levikonstandi β jaoks.



Joonis 2.1: Levikonstandi β sõltuvus parameetrist V . Kui $V < 2.405$, siis eksisteerib ainult üks võimalik β , ehk kiud on ühemoodiline.

Jooniselt **2.1** on näha, et kui on täidetud tingimus

$$0 < V < 2.405 \quad (2.12)$$

siis saab lainejuhis levida ainult 1 lubatud mood. Sellist optilist kiudu nimetatakse ühemoodiliseks (*single mode fiber*).

Ühemoodilises kius levivat valgust kirjeldab suure täpsusega Gaussi funktsioon $\Psi(r) = A \exp(-r^2/\omega^2)$, kus suurus ω on moodi laius (*spot size of the mode field pattern*). Empiiriline valem ühemoodilise kiu moodi laiuse leidmiseks avaldub järgmiselt [7]

$$\omega = a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad (2.13)$$

Ülaltoodud valem annab hinnagu ω -le 1%-se täpsusega.

2.2 Footonkristallid

Footonkristallid on kristallid, mis omavad perioodilist murdumisnäitaja jaotust. Üks lihtsaim footonkristall on kahest eri murdumisnäitajaga kilematerjalist koosnev pakett, mida käsitleme järgnevas töös. Üks tähtsametest footonkristallide omadustest on nn valguse keelutsoonide teke teatud suundades. Valguse keelutsoonide käitumine on väga sarnane elektronide keelutsoonidele pooljuhtkristallides. Keelutsoonide olemasolu põhjustab olukorra, kus kristallist ei pääse välja elektromagnetlained, mille ringsagedus ω jääb vahemikku $\Delta\omega$. [1]

Ühemõõtmelised footonkristallid

Üks lihtsamatest footonkristallidest on Braggi peegel, mis koosneb vahelduvatest erineva murdumisnäitajatega kihtidest n_1 ja n_2 paksustega d_1 ning d_2 , kusjuures suurust $a = d_1 + d_2$ nimetatakse võrekonstandiks. Fresneli peegeldusteooriast järeldub, et sellise ühemõõtmelise konfiguratsiooni jaoks võivad leiduda lainepikkused λ_m , mille puhul igalt kahe keskkonna eralduspinnalt tagasi-pegelduvad lained on faasis ehk on täidetud konstruktiivse interferentsi tingimus.

$$m\lambda_m = 4d_1n_1 = 4d_2n_2, \quad m \in \mathbb{N} \quad (2.14)$$

Kusjuures, juhu jaoks, kus $d_1 = d_2 = a/2$ ei eksisteeri lainepikkust, mille jaoks kehtiks konstruktiivse interferentsi tingimus 2.14.

Keelutsoonide kirjeldamiseks on parem mitte kasutada suurust $\Delta\omega$, sest footonkristalli murdumisnäitaja konfiguratsiooni $n(\vec{r})$ muutmisel $n(\vec{r}/s)$ -ks, väheneb ka $\Delta\omega$ s korda, millest johtub, et footonkristallid evivad endas mastaabi-invariantsuse omadust. See omadus lubab uurida optiliste lainejuhtide asemel hoopis suurendatud lainejuhte, mida on kergem valmistada. Kusjuures kõik füüsikalised aspektid nagu valguse sidustumine, lekkimine jne algse ringsageduse ω jaoks jäävad muutumatuks mastaabiteisendusel ringsageduse ω/s jaoks. [1]

Seega keelutsoonide kirjeldamiseks on mõistlik kasutada hoopis suurust r , mis on invariantne mastaabiteisendustel.

$$r = \frac{\Delta\omega}{\omega_m}, \quad (2.15)$$

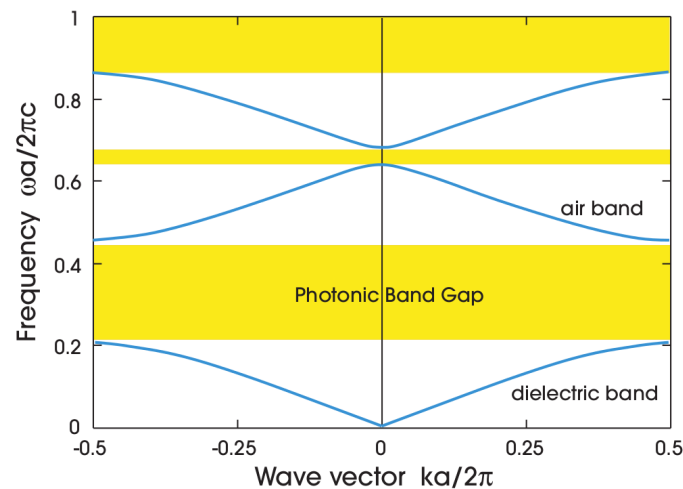
kus

$\Delta\omega$ - keelutsooni laius

ω_m - sagedus keelutsooni keskel

r - keelutsooni laiuse suhe keskmisesse sagedusse (*gap-midgap ratio*)

Näide illustreerimaks konstruktiivse interferentsi tähtsust: Kui $d_1 = d_2 = a/2$ ja $\epsilon_1/\epsilon_2 = 13$, siis numbrilised meetodid annavad suuruse r väärtuseks $r = 51.9\%$. Samas, kui $d_1 = 0.217a$, $d_2 = (1 - 0.217)a$ ja $\epsilon_1/\epsilon_2 = 13$, siis saame et $r = 76.6\%$. [1]



Joonis 2.2: Keelutsoonid Braggi peegli jaoks, kus $\epsilon_1 = 13$, $d_1 = 0.2a$, $d_2 = 0.8a$, $\epsilon_2 = 1$. Abtsiss-teljel on normeeritud levikusuunaline lainevektor ning ordinaatteljel on EM-laine normeeritud sagedus. Nagu jooniselt näha, siis footonkristalli jaoks eksisteerib sagedusvahemik, kus valgus antud suunas levida ei saa. [1]

Footonkristallkiud

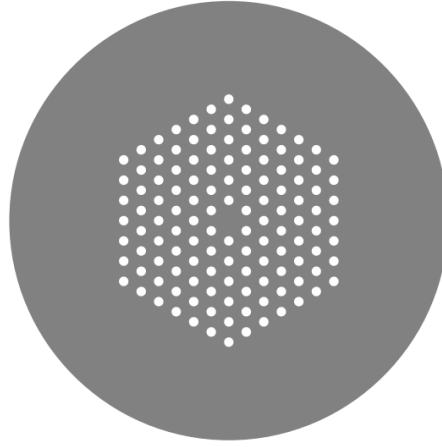
Footonkristalli keelutsoonide abil on võimalik luua optilisi kiudusid. Kius valguse lõksustumise saavutamiseks ümbritsetakse südamik 2-mõõtmelise footonkristalliga, kus antud sagedustele on levimine keelatud ning seega levib valgus vaid kiu südamikus [1].

Footonkristallkiudude leiutamist motiveerisid mitmed eelised astmelise murdumisnäitajaga kiudude ees.

1. Astmelise murdumisnäitajaga optiliste kiudude väike numbriline apertuur põhjustab suuri paindekadusid. Näiteks lainepikkuse $\lambda = 1550nm$ juures on Corning SMF-28 kiu jaoks võimsuskadu 0.5 dB, kui kiudu on tehtud silmus, mille diameeter on 32 mm [3].
2. Õõnsa südamikuga footonkristallkiud on sobilikud kõrge konstantse intentsiivsusega valguse ning samuti ülilühikeste valgusimpulsside juhtimiseks.

Käesoleva too praktilises osas kasutatakse NKT-Photonics LMA-5 footonkristallkiudu [9], mille ristlõige on kujutatud joonisel 2.3.

Valguse leviku matemaatilisel kirjeldamisel footonkristallkiududes on eeldatud, et kristallis esineb lõpmatu ulatusega diskreetne nihkesümmeetria. Praktikas on valgus lõksustatav juba mõningate õõnsustega südamiku ümber [10].



Joonis 2.3: NKT-Photonics LMA-5 footonkristallkiu ristlõige, kus valgud alad on õõnsused ja hall ala on klaas. [9]

2.3 Valguse sidustumine

Näitame valemiga **2.8**, et kius levivat valgust on võimalik esitada moodide superpositsioonina. Kui võtta, et $s(r, \phi)$ on näiteks kiu otsale pealelangeva laservalguse elektriväli, siis saab $s(r, \phi)$ ritta arendada lainejuhi moodide $\psi_{lm}(r, \phi)$ kaudu järgmiselt [11] :

$$s(r, \phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M c_{lm} \psi_{lm}(r, \phi) \quad (2.16)$$

Kus

L - maksimaalne l väärtus, $L = \frac{2V}{\pi}$

M - maksimaalne m väärtus, $M = \frac{V}{\pi} - \frac{l}{2}$

Koefitsient c_{lm} näitab, kui sarane on elektrivälja jaotus pealelangeva valguse $s(r, \phi)$ ja lainejuhis leviva moodi $\Phi(r, \phi)$ vahel. Koefitsiendi saab leida järgmiselt (* operaator tähendab kaaskompleksi):

$$c_{lm} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s^*(r, \phi) \Phi(r, \phi) d\phi dr \right| \quad (2.17)$$

Kui funktsioonid $s(r, \phi)$ ja $\Phi(r, \phi)$ on normeeritud ühele, siis näitab koefitsient c_{lm} sidustumisefektiivsust T . [2]

Valguse sidustumine laserist optilisse kiudu

Üks viisidest, kuidas juhtida valgus laserist fiibrisse, on valguse koondamine läätsega kiu otsale. Lääts on mõistlik valida nii, et laseri Gaussi kimbu

$$u(x, y, z, \omega_0) = \frac{iA\pi}{\lambda} \frac{2\omega_0^2}{2z + ik\omega_0^2} \exp \left[-ik \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z, \omega_0)} \right) \right] \exp \left(\frac{-(x^2 + y^2)}{\omega^2(z, \omega_0)} \right), \quad (2.18)$$

kus

$$R(z, \omega_0) = z \left(1 + \frac{k^2 \omega_0^4}{4z^2} \right) \quad (2.19)$$

ja

$$\omega(z, \omega_0) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{4z^2}{k^2 \omega_0^4}} \quad (2.20)$$

läätses koondamisel asuks kimbu talje W'_0 kiu otsal ja oleks ligilähedaselt võrdne kius leviva moodi laiusega ω **2.13**.

$$W'_0 = \frac{2\lambda f}{\pi D}, \quad (2.21)$$

kus

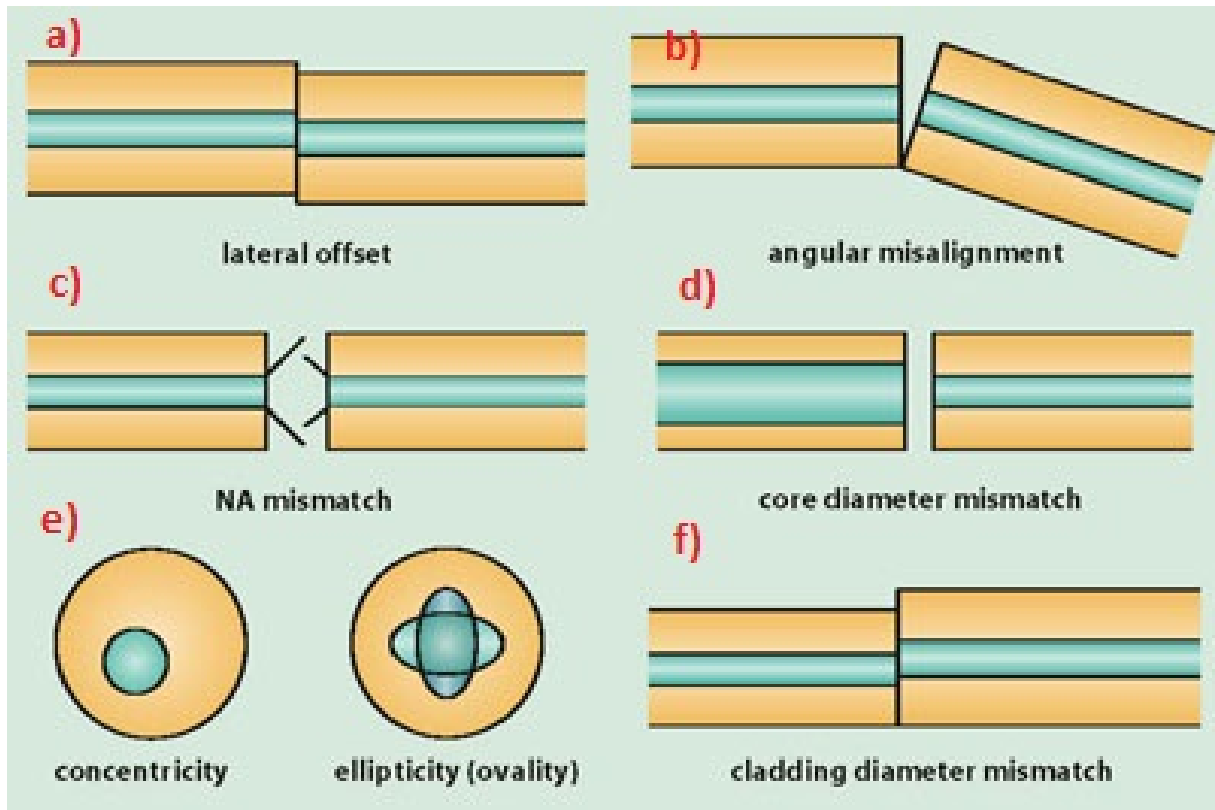
λ - laseri lainepikkus

f - läätses fookuskaugus

D - ümmarguse pinna läbimõõt, millelt valgus difrakteerub

2.4 Erinevad kaod kiudude ühendamisel

Kui optilisi kiude ühendada, ilmnevad erinevat tüüpi kaod. Joonisel **2.4** on toodud ära enimlevinud kadusid põhjustavad kiudude asendid [12]. Alampeatükides käsitleme tähtsamaid kaomehhanisme.



Joonis 2.4: Kaod kiudude ühendamisel.

Kaod kiudude ristnihkel

Käsitleme joonisel **2.4** paneelil a kujutatud olukorda, kus ristnihke tähistame u -ga. Defineerime suuruse T , mis näitab kui suur osa võimsusest kandub teise kiudu edasi eeldusel, et mõlemad kiud on ühemoodilised, ehk on täidetud tingimus **2.12**. Sellisel juhul võib kasutada EM väljade kirjeldamiseks Gaussi kimpu.

$$T = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_1 \psi_2^* dx dy \right| \quad (2.22)$$

kus

ψ_1 - esimeses kius leviva moodi kuju

ψ_2^* - teises kius leviva moodi konjugeeritud kuju

Pärast mõningaid matemamaatilisi teisendusi saame:

$$T = \left(\frac{2\omega_1 \omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right)^2 \exp \left(-\frac{2u^2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right) \quad (2.23)$$

Kus

ω_1 - esimeses kius leviva moodi laius

ω_2 - teises kius leviva moodi laius

Maksimaalne T väärtus saavutatakse kui $u = 0$. Sellisel juhul saame võimsuskao :

$$T = \left(\frac{2\omega_1 \omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2^2} \right)^2 \quad (2.24)$$

Võimsus väheneb ca. 2.3%, kui on täidetud tingimus:

$$0.86 < \frac{\omega_1}{\omega_2} < 1.16 \quad (2.25)$$

Seega, isegi 14% kimbu laiuste erinevuste juures on võimsuskadu vähem kui 0.1 dB ehk 2.3%.

Kaod, kui kiud on üksteise suhtes nurga all

Antud situatsiooni kirjeldab joonise **2.4** paneel b. Võimsuskadu, kui nurk kahe kiu sümmeetria-telje vahel on θ , antakse valemiga:

$$\alpha_a(dB) = 4.34 \log \left(\frac{\pi n_1 \omega \theta}{\lambda_0} \right)^2 \quad (2.26)$$

Näide: On antud ühemoodiline kiud mille $\omega = 5\mu m$, $\lambda_0 = 1300nm$ $n_1 \simeq n_2 = 1.45$ ning $\alpha_a(dB) < 0.1dB$. Sellisel juhul saame kahe kiu vahelise nurga jaoks tingimuse $\theta < 0.5 \text{ deg}$.

Kaod, kui kiud on üksteisest eemaldatud

Eeldame, et kiudude südamikud asuvad ühel teljel. Võimsuskadu, kui kahe kiu vahel on tühimik D murdumisnäitajaga n_l , antakse valemiga:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{1 + \tilde{D}^2} \quad (2.27)$$

$$\tilde{D} = \frac{D\lambda_0}{2\pi n_l \omega^2} \quad (2.28)$$

Näide laboris kasutatava ühemoodilise kiu 630Hp jaoks $\omega = 3.5 \mu m$, $\lambda_0 = 632.8 nm$ $n_1 \simeq n_2 = 1.45$ ning $D = 20 \mu m$. Sellisel juhul saame võimsuskaoks 1.4 %.

Ülaltoodud näitest saame järeldada, et pikisuunaline vahe ei põhjusta suurt võimsuskadu. Lisaks tuleb tähelepanu pöörata Fresneli peegelduskadudele optiliste kiudude puutepindades väliskeskkonnaga. Tavaliselt minimeeritakse Fresneli peegelduskadusid valides keskkonna murdumisnäitajaks $n_l \simeq n_1$. Juhul, kui kiudude otsad on paralleelsed, võivad esineda paljudest peegeldustest tingitud efektid (*Fabry-Perot efektid*). Sellisel juhul võimsuskadu $\alpha_l(dB)$ on perioodiline funktsioon D -st. Ruumiline periood sellisel juhul tuleb umbes pool valguse lainepikkust. Mõningatel juhtudel võib selline efekt tekitada tagasiside pooljuht-laseris, põhjustades laseri ebastabiilsuse.

2.5 Optiliste kiudude ühendamise

Erinevalt tavalistest metalljuhtmetest, mille ühendamine on hästi teostatav näiteks jootmise kaudu, on optiliste kiudude ühendamine märksa komplitseeritum. Optilises kius kannab informatsiooni edasi valgus, mille sidustamine ühest kiu otsast teise kiu otsa evib endas mitmeid probleeme. Siiski pole tegemist lahendamatu probleemiga ning optiliste kiudude ühendamiseks on olemas mitmeid meetodeid [13].

1. Püsiv, stabiilne ja madala energiakaoga ühendus fiibrite vahel on saavutatav fiibrite otste kokkusulutamise teel.
2. Kasutatakse ka mehaanilisi ühendusi, mis hoiavad kiudude otsi vastastikku. Tavaliselt kasutatakse ühenduskohtades võrdse murdumisnäitajaga geeli või epoksiidvaiku peegelduskadude minimeerimiseks. Mehaanilised ühendused on hõlpsamini valmistatavad ja demonteeritavad võrreldes kokkusulatatud ühendustega.
3. Keermestatud ühendused, mida uuritakse selles töös, on kõige mugavamad fiibrite ühendamiseks mitte-laboratoorses tingimustes ning samuti ka siis kui fiibreid on vaja ühendada lühikesteks ajavahemikeks.

3 Footonkristallkiu kirjeldamine

Valguse sidustumiskoeffitsiendi uurimiseks on vaja esmalt määrata footonkristallis levivat elektromagnetvälja (EM-välja) kirjeldavad parameetrid. Parameetrite määramiseks mõõdame esmalt footonkristallkiust väljuva valguse intensiivsusemustrit kaugväljas. Seejärel leiame parima hinnangu mõõdetud tulemusele vähimruutude meetodiga kasutades lähendamiseks teoreetilisi valemid.

3.1 Footonkristallist väljuv kiirgus

LMA-5 PC kius leviv EM väli on kirjeldatav peamise Gaussi kimbuga $u(x, y, z, \omega_c)$ millest on maha lahutatud 6 väiksemat Gaussi kimpu. Footonkristallist väljuva elektromagnetkiirguse elektrivälja saab kirja panna järgmiselt [8]:

$$E = A \left[u(x, y, z, \omega_c) - \gamma \sum_{j=1}^6 u \left(x - \cos \left(\frac{2\pi j}{6} \right) \cdot R_c, y - \sin \left(\frac{2\pi j}{6} \right) \cdot R_c, z, \omega_h \right) \right] \quad (3.1)$$

Kus

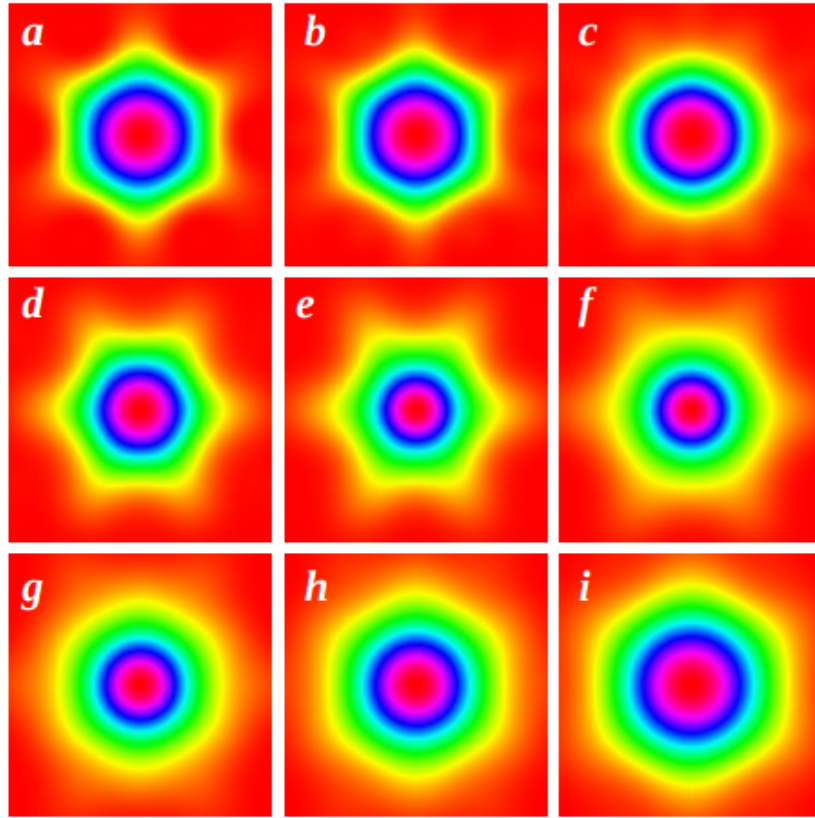
$u(x, y, z, \omega)$ - Gaussi kimbu elektriväli

ω_c - keskmise Gaussi kimbu laius footonkristallis levimisel (footonkristallist väljas hakkab Gaussi kimp laienema)

ω_h - kõrval asuva Gaussi kimbu laius footonkristallis

R_c - kõrval asuva Gaussi kimbu keskkoha kaugus keskmise Gaussi kimbu keskkohast

γ - kõrval asuva Gaussi kimbu amplituudi suhe keskel oleva Gaussi kimbu amplituudi



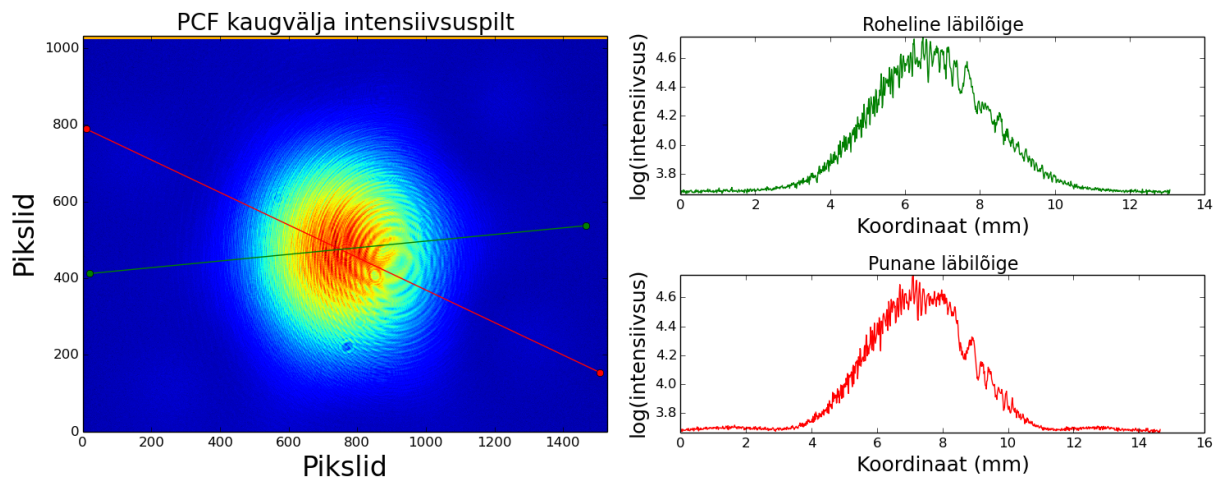
Joonis 3.1: Intensiivus lähiväljas, saaduna võrrandist 3.1, kus z väärtust igal järgneval paneelil suurendatakse. On näha, et z suurendamisel algne intensiivsuseprofiili kuju pöördub 30 kraadi võrra ning see on kooskõlas eksperimendiga. [8]

Uurimaks valguse sidustumist ühemoodilisest kiust LMA-5 footonkristallkiudu on vaja teada LMA-5 kius leviva moodi kuju ning selleks on vaja eksperimentaalselt määrata neli footonkristalli iseloomustavat parameetrit ω_c , ω_h , γ ja R_C .

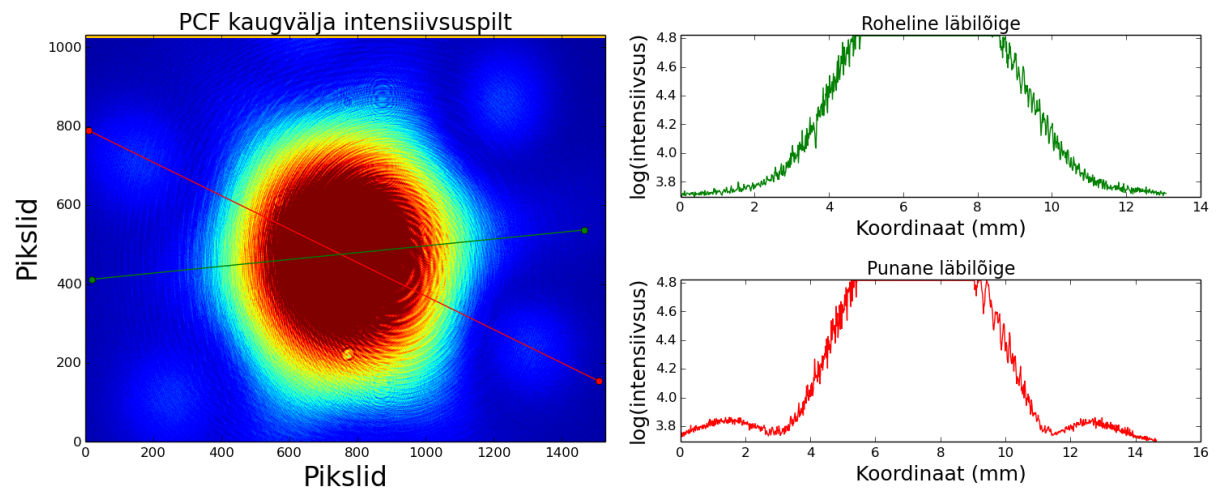
3.2 Footonkristalli valguse intensiivsuse mõõtmine kaugväljas

Footonkristalli iseloomustavaid parameetreid ω_c , ω_h ja γ on võimalik määrata kui mõõta LMA-5 kiust väljuva valguse intensiivsuse muster kaugväljas CCD kaamera.

Intensiivsuspildi saamiseks lasti valgus fibrist 23 mm kaugusel oleva CCD kaamera sensori peale ning salvestati intensiivsuse muster. Kõikidel järgnevatel joonistel on intensiivsus logaritmilises teljestikus, et paremini kõrvalmaksimume eristada.



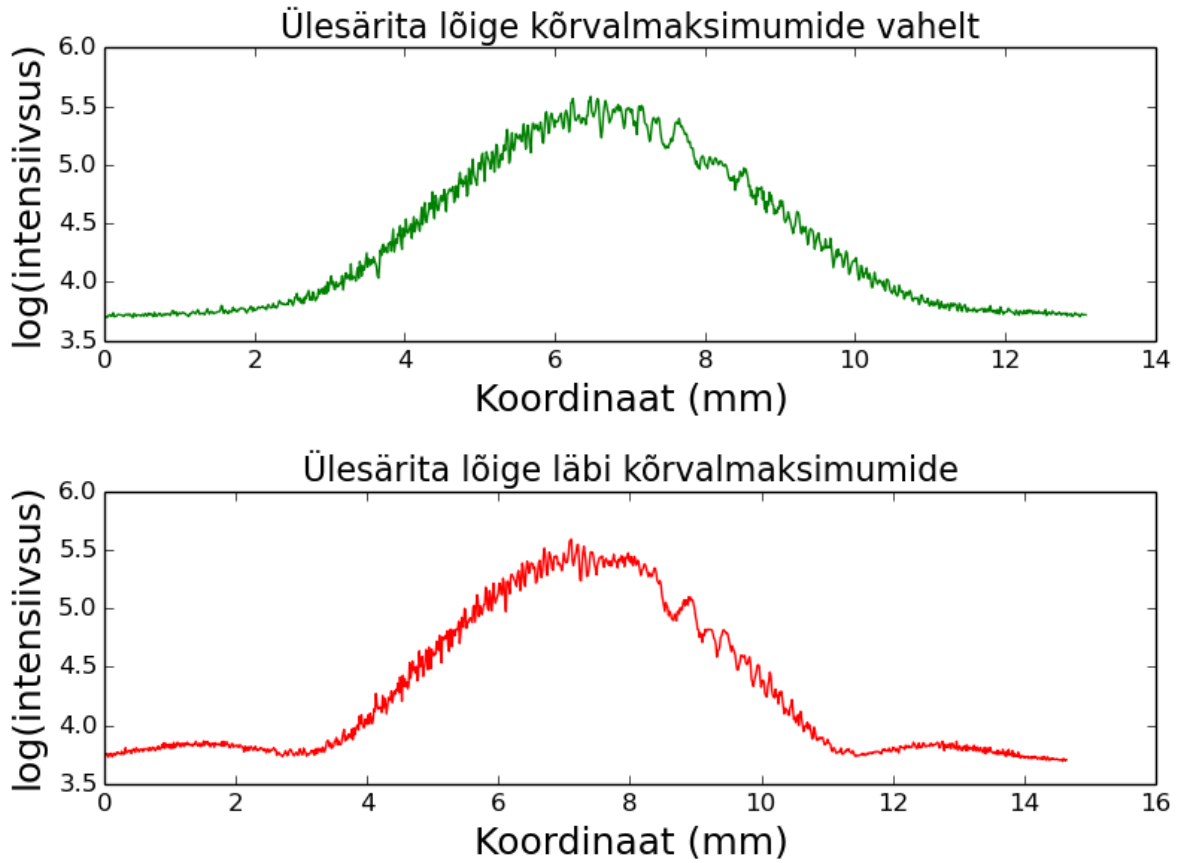
Joonis 3.2: LMA-5 kiirgusepilt koos kahe iseäraliku lõikega kaugväljas. Kõrvalmaksimumid on raskesti tuvastatavad.



Joonis 3.3: LMA-5 kiirguse intensiivsus koos kahe iseäraliku lõikega kaugväljas. Kõrvalmaksimumid on eristatavad, kuid pilt on ülesäritatud.

Kõrvalmaksimumide paremaks väljatoomiseks lähendati joonisel **3.3** olevate lõigete ülesäritatud osasid joonise **3.2** lõigetega. Lähendamise jaoks tehti eeldus, et intensiivsuspildi mingi piksli väärtus (mitte logaritmiline väärtus vaid reaalne mõõdetav väärtus) sõltub lineaarselt säriajast. Joonise **3.2** punast lõiget kirjeldab funktsioon $I_1(x)$ ja joonise **3.3** punast lõiget kirjeldava funktsiooni võime näiteks kirja panna kujul $a \cdot I_1(x) + b$.

Kui ülesäritatud lõikel fikseerida koordinaadid x_1 ja x_2 niimoodi et lõik $[x_1, x_2]$ on ülesäritatud intervall, siis saab konstantide a ja b määramiseks lähendada ülesäritatud lõigu intervallile $[0, x_1)$ ja (x_2, ∞) alasäritatud lõigu samade intervallidega. Ülesäritatud lõike intensiivsuse väärtused lõigul $[x_1, x_2]$ lõigul on võimalik määrata nüüd funktsiooniga $a \cdot I_1(x) + b$. Toome ka saadud tulemuse joonisel **3.5**



Joonis 3.4: Lõplikud lõiked fittimiseks.

3.3 Footonkristalli iseloomustavate parameetrite määramine kaugvälja intensiivsuspildst

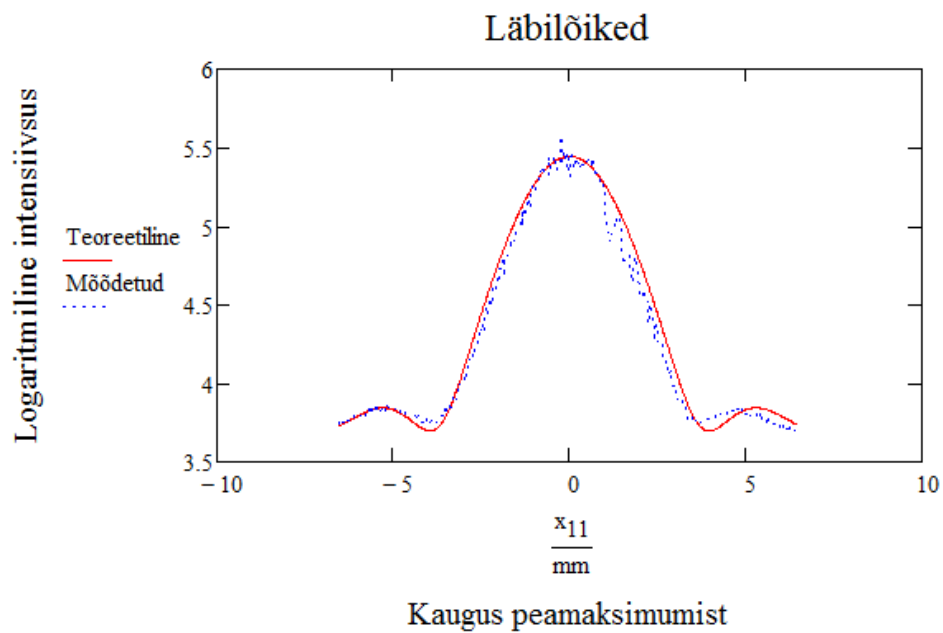
Kasutades Mathcad ver. 14, määrati PC kiust väljunud kiirguse intensiivsust iseloomustavad parameetrid võrrandis 3.1. Kaugus CCD kaamera sensorini oli $z = 23 \text{ mm}$. Parameetrite määramiseks kasutati teoreetilise intensiivsuse funktsiooni kõrvalmaksimume läbiva lõike lähendamist joonisel 3.5 oleva vastava lõikega.

Teoreetilise ja mõõdetud kõvera võrdlust võib näha joonisel 3.5. PCF kiust väljuva elektrivälja võrrandit

$$E = A \left[u(x, y, z, \omega_c) - \gamma \sum_{j=1}^6 u \left(x - \cos \left(\frac{2\pi j}{6} \right) \cdot R_c, y - \sin \left(\frac{2\pi j}{6} \right) \cdot R_c, z, \omega_h \right) \right]$$

kirjeldatavate parameetrite väärtuseks saadi järgmised tulemused:

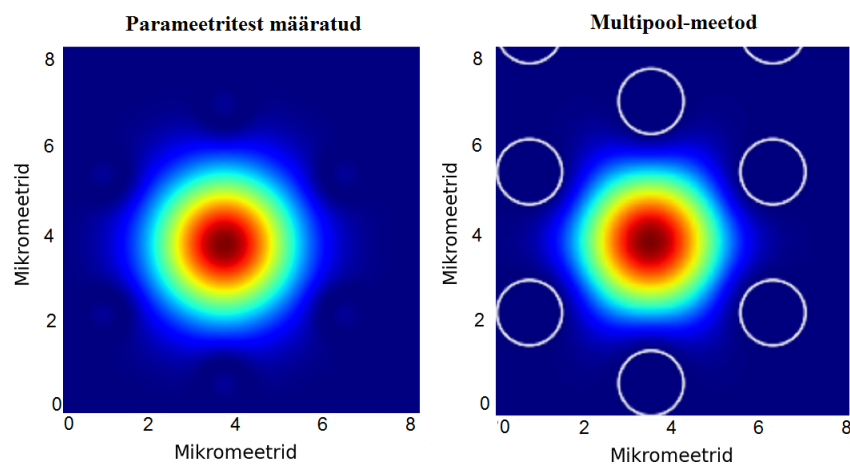
$$\begin{aligned} \omega_c &= 2.3 \mu\text{m}, \\ \omega_h &= 0.6 \mu\text{m}, \\ \gamma &= 0.3, \\ R_c &= 3.1 \mu\text{m} \end{aligned} \tag{3.2}$$



Joonis 3.5: Teoreetilise ja mõõdetud intensiivsusprofili lõike võrdlus. Antud lõige läbib kahte kõrvamiinimumi.

Kuna mõõdetud lõikel ei asunud kõrvalmaksimumid peamaksimumist samal kaugusel, kasutati lähendamiseks peamaksimumist vasakule jäävat osa.

Et hinnata parameetrite **3.2** usaldusväärsust, võrdleme võrrandist **3.3** saadud intensiivsust kohal $z = 0$ Jaagup Repäni töös [14] multipool-meetodiga leitud valgusvälja intensiivsusega joonisel **3.6**.



Joonis 3.6: Leitud parameetritest **3.2** saadud intensiivsus vasakul ja multipool-meetodiga saadud intensiivsus paremal, kus valged ringid tähistavad näitlikustamise eesmärgil õhuavasid PC kius.

Parameetritest määratud profiilil võib ka näha täiendavat kuut kõrvalmaksimumi, mida multipool-meetodiga leitud intensiivsuspildil näha ei ole. Siiski on joonisel **3.6** näha, et kiu otsal leitud välja profiil sobitub hästi multipool meetodiga saadud välja profiiliga.

Samuti läheb parameetritest määratud PCF lähivälja intensiivsuspilt kooskõlla tootja spetsifikatsioonides välja toodud LMA-5 kiu MFD-ga (*mode field diameter*), milleks on $4.7 \mu\text{m}$.

4 Valguse sidustumine

Olles välja arvutanud eelmises peatükis footonkristallkius leviva EM-välja, on võimalik võrrelda nüüd selles peatükis teoreetilist ja praktilist sidustumisefektiivsust. Töö praktiline osa algab koondava läätsega valguse sidustamisega ühemoodilisse optilisse kiudu. Kümne millimeetrise fookuskaugusega läätsega suudeti realiseerida 75% teoreetilisest sidustumisefektiivsusest. Järgmisena uuriti SI kiud->SI kiud ja SI kiud->PC kiud sidustumisefektiivsust.

4.1 Valguse sidustumine laserist ühemoodilisse kiudu

Esimeseks praktiliseks ülesandeks oli sidustada HeNe HRP050 632.8 nm laseri valgus optilisse kiudu. Selleks fokuseeriti laseri valgus koondava läätsega fibri otsale. Lääts valiti nii, et valguse difrakteerumisel läbi läätse ühtiksid Gaussi kimbu talje asukoht ja vastuvõtva kiu asukoht. Teisena vaadati, et Gaussi kimbu talje läbimõõt d_f oleks ligilähedaselt võrdne kahekordse moodi laiusega 2ω **2.13**.

HeNe lasertäpi laius (kaugus maksimumist, mille puhul intensiivsus väheneb e^2 korda) määrati CCD kaamera sensorilt ja tulemuseks saadi :

$$D = 385 \text{ pix} \cdot 2.2 \frac{\mu\text{m}}{\text{pix}} = 0.847 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Lainejuhi parameeter V tuleb kasutatava lainepikkuse ja kiu jaoks:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \text{NA} = \frac{2\pi}{638.2 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{3.5 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 0.13 = 2.4 \quad (4.2)$$

V väärtus on väiksem kui 2.405, ehk kiud on ühemoodiline antud lainepikkuse jaoks.

Järgmiseks arvutame kius leviva moodi laiuse. Kiu läbimõõt on $d = 2a = 3.5 \mu\text{m}$. Moodi laius ω (võrrand **2.13**) avaldub järgmiselt:

$$\omega = a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right) = 1.93 \mu\text{m} \quad (4.3)$$

Kommertsiaalselt on üldiselt levinud naturaalarvulise fookuskaugustega (möödetuna millimeetrites) läätсед. Suurim sidustumisefektiivsus naturaalarvulise fookuskaugusega läätsega saavutatakse siis kui $f = 8 \text{ mm}$. Laserkiire laius fibri otsal, kui $f = 8 \text{ mm}$, on:

$$W'_0 = \frac{\lambda f}{\pi D} = 1.90 \mu\text{m} \quad (4.4)$$

Arvutame teoreetilise sidustumisefektiivsuse **2.23** eeldusel, et optiline skeem on perfektselt juusteeritud ning samuti arvestades Fresneli peegelduskadudega. Fresneli peegelduskadude arvutamiseks võime valguse langemisnurga lugeda nulliks ning kokku on sidustamisel 4 peegeldust - 2 peegeldust läätse pealt ja 2 peegeldust optilise kiu mõlemast otsast.

$$T = 0.96^4 \left(\frac{2W'_0 \cdot \omega_2}{W'^2_0 + \omega_2^2} \right)^2 = 85.0\% \quad (4.5)$$

Kui $f = 10\text{ mm}$, siis saame teoreetiliseks sidustamisefektiivsuseks $T = 80.6\%$. Mõõdetud sidustumisefektiivsuse T_m saamiseks mõõtsime me ThorLabs S401C sensoriga laservalguse võimsuse P_{laser} ja kiust väljunud valguse võimsuse P_{kiud} . Mõõdetud sidustamisefektiivsus tuli:

$$T_m = \frac{P_{kiud}}{P_{laser}} = \frac{2.71\text{ mW}}{4.291\text{ mW}} = 63.2\% \quad (4.6)$$

Nihuti nihutamistäpsus spetsifikatsiooni põhjal on 200 nm. Võimsusmõõtja näit on vaja kõigis kolmes mõõtmes maksimeerida. Näidu maksimeerimise ajal toimub iseenesest teatav fluktuueerumine mehaaniliste ebastabiilsuste jms tõttu. Ehk 22-protsendiline puudjäak teoreetiliselt saavutatavast T -st ei ole väga ootamatu.

Määrasime sidustumisefektiivsuse ka suurema fookuskaugusega läätsega. Kui $f = 20\text{ mm}$, siis laserkiire laius fiibri otsal on:

$$W'_0 = \frac{\lambda f}{\pi D} = 4.78\text{ }\mu\text{m} \quad (4.7)$$

Sellisel juhul saame teoreetiliseks sidustumisefektiivsuseks,:

$$T = 0.96^4 \left(\frac{2W'_0 \cdot \omega_2}{W'^2_0 + \omega_2^2} \right)^2 = 41.0\% \quad (4.8)$$

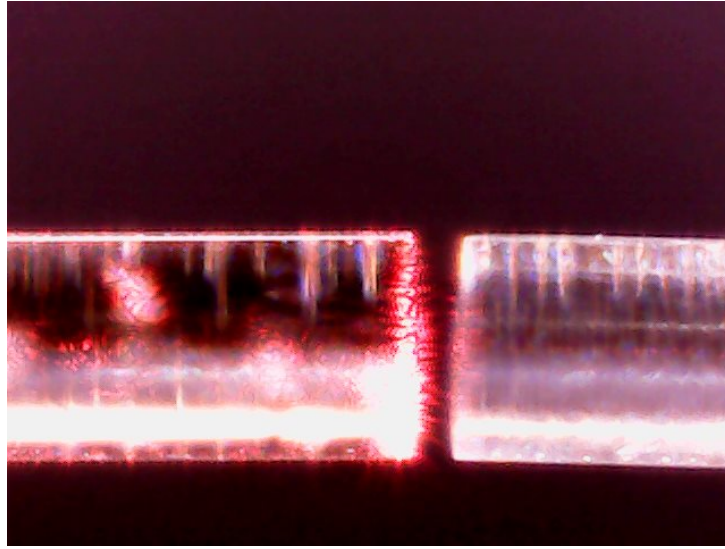
Mõõdetud sidustumisefektiivsus tuli :

$$T_m = \frac{P_{kiud}}{P_{laser}} = \frac{0.93\text{ mW}}{4.291\text{ mW}} = 21.7\% \quad (4.9)$$

Taaskord võib mõõdetud suuruse ja teoreetilise suuruse erinevuse põhjuseks lugeda täppisnihuti fluktuueerumist mehaaniliste ebastabiilsuste tõttu.

4.2 Valguse sidustumine ühemoodilisest kiust ühemoodilisse kiudu

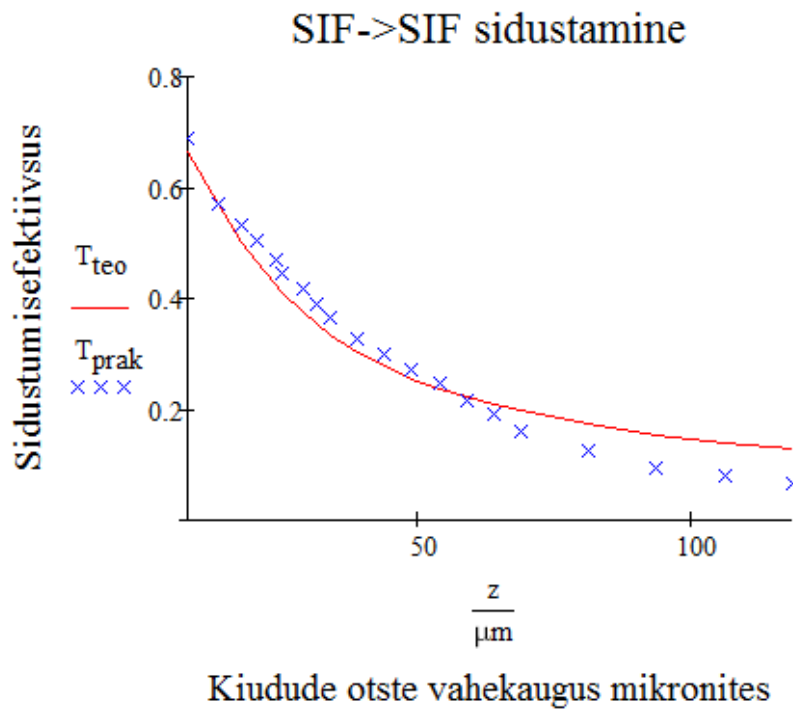
Selles peatükis võrdleme me teoreetilist sidustumisefektiivsust eksperimentis mõõdetuga. Eksperimenti algfaasis lähendati kaks kiu otsa üksteisele võimalikult lähedale. Kiudude vahekaugus eemaldamisprotseduuri alghetkel oli $d_0 = 7.5\text{ }\mu\text{m}$. Võimsus esimeses kius oli 2.51 mW ning seda suurust lugesime me mõõtmise ajal muutumatuks.



Joonis 4.1: Kiud nähtuna läbi 1000 kordse mikroskoobi suurenduse. Antud joonisel on kiudude vahekaugus $24 \mu m$, nurk sümmeetriatelgede vahel 2.3 kraadi ja sidustumisefektiivsus 47%

Toome ära ka graafiku **4.2**, kus on võrreldud mõõdetud ja teoreetilist sidustumisefektiivsust, mis sõltub kiudude vahekaugusest. Kasutame SI kiust väljuvat elektrivälja kirjeldavat Gaussi kimpu $u(x, y, z)$ mille z koordinaati varieeritakse ja teist Gaussi kimpu $u(x, y, z = 0)$ T_{teo} arvutamiseks. Mikroskoobiga tehtud pildidelt määrati, et mõõtmise ajal oli kiudude omavaheline nurk vahemikus $1-4$ kraadi. Võrrandis **4.10** on u normeeritud ning on eeldatud, et justeerimisel esines $d_0 = 1.2 \mu m$ suurune nihe ja $\alpha_0 = 3.4^\circ$ suurune nurk kiudude sümmeetriatelgede vahel. Peame veel vajalikuks märkida, et $T_{teo}(z)$ juures nurga α_0 arvestamine ei ole matemaatiliselt mõttes täiesti korrektne. Nurka α_0 arvestatakse funktsiooni $u(x, y, z)$ esimeses argumentis. Teostatakse muutujavahetus $x \rightarrow x - d_0 + z \sin(\alpha_0)$. See muutujavahetus põhjustab z suurenedes suureneva nihke kius leviva Gaussi kimbu ja pealelangeva Gaussi kimbu keskkohdade vahel. Arvestame ka Fresneli peegelduskadudega, ehk korrutame avaldise läbi koefitsiendiga 0.96 . Teoreetilise sidustumisefektiivsuse jaoks saame seega valemi (operaator $*$ tähendab funktsiooni kaaskompleksi).

$$T_{teo}(z) = 0.96 \cdot \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u^*(x - d_0 + z \sin(\alpha_0), y, z) \cdot u(x, y, z = 0) dx dy \right| \quad (4.10)$$



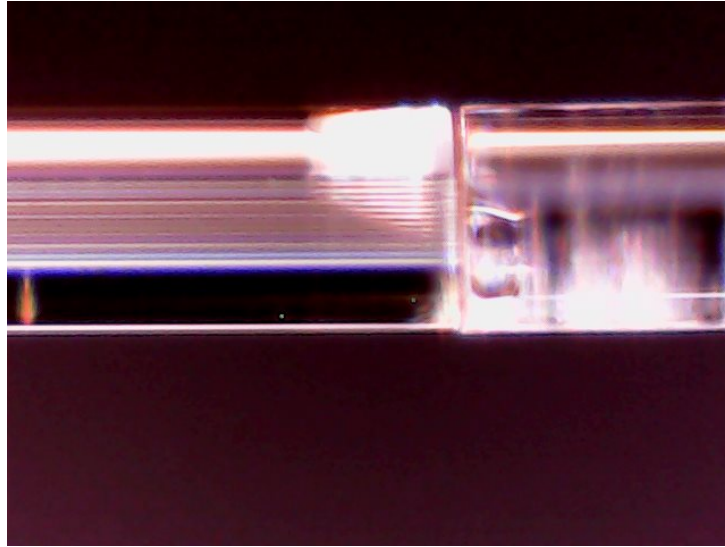
Joonis 4.2: Teoreetilise ja praktilise sidustumisefektiivsuse võrdlus

Jooniselt on näha et teoreetiline ja mõõdetud kõver ühtivad rahuldavalt.

4.3 Valguse sidustamine ühemoodilisest SI kiust footonkristallkiudu

Selles peatükis uurime eksperimentaalselt valguse sidustumist ühemoodilisest astmelise murdumisnäitajaga 630HP kiust LMA-5 footonkristallkiudu. Eesmärgiks oli uurida sidustumiskoeffitsiendi sõltuvust kiudude vahekaugusest. Paraku teoreetilist sidustumisefektiivsust kirjeldav funktsioon ja mõõdetud väärtused ei sobitunud. Võimalikuks mitesobitumise põhjuseks võib suure tõenäosusega olla footonkristallkiu otsa lõikekvaliteet.

Võimsus ühemoodilises SI kius oli 2.41 mW. Kiudude vahekaugus eemaldamisprotseduuri alghetkel oli $d_0 = 4.9 \mu m$.



Joonis 4.3: PC kiud (vasakul) ja SI kiud (paremal) läbi mikroskoobi, 1000-kordse suurendusega. Antud joonisel on kiudude vahekaugus $4.9\mu m$, nurk sümmeetriatelgede vahel 1.1 kraadi ja sidustumiseefektiivsus 50%

Kasutame võrrandiga 3.3 kirjeldavat PCF elektrivälja kaugusel $z=0$ ja SIF kiust Gaussi kimpu $u(x, y, z)$ 2.18, mille kaugust z varieeritakse, $T_{teo,PC}$ arvutamiseks. Arvestame ka Fresneli peegelduskadudega, ehk korrutame avaldise läbi koefitsiendiga 0.96. Teoreetilise sidustumiseefektiivsuse jaoks saame seega valemi (operaator $*$ tähendab funktsiooni kaaskompleksi):

$$T_{teo,PC}(z) = 0.96 * \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u^*(x, y, z) \cdot E(x, y, z = 0) dx dy \right| \quad (4.11)$$

Kui Fresneli peegelduskadusid ignoreerida, siis saame maksimaalseks teoreetiliseks sidustumiseefektiivsuseks $T_{teo,PC}(0\mu m) = 98.3\%$. Täielik 100%-line sidustumine pole võimalik, sest kiududes levivad moodid erinevad vähesel määral. Maksimaalne sidustimiseefektiivsus $T_{max} = 50\%$ saavutati joonisel 4.3 oleva kiu paigutusega. Teoreetiline sidustumiseefektiivsus selle kauguse jaoks tuleb $T_{teo,PC}(4.9\mu m) = 84.2\%$.

4.4 Kommertsiaalsed ühendused (*Mating Sleeves*)

On olemas kommertsiaalsed ühendused fikseerimaks keermes-ühendusega varustatud kiude vastastikku. *ADAFCl Mating Sleeve* ühendust (vt joonist 4.4) kasutades saadi kahe SI kiu ühendamisel sidustumiseefektiivsuseks:

$$T = \frac{P_1}{P_2} = \frac{40\mu W}{2710\mu W} = 1.5\% \quad (4.12)$$

Kus

P_1 - valguse võimsus esimeses kius

P_2 - valguse võimsus teises kius



Joonis 4.4: Optiliste kiudude ühendus *ADAFC1 Mating Sleeve*

Saadud sidustumisefektiivsus on oodatust palju väiksem. Põhjuseks võib olla kruviühenduse mehaaniline täpsus. Eelnevas nägime, et kiu otsad peavad olema paari mikronilise täpsusega kohakuti, mida on antud ühenduse abil keeruline saavutada.

4.5 Valguse sidustumine paraboolpeeglitest koosneva süsteemi abil

Töös uuriti kolmanda sidustamisvõimalusena paraboolpeeglitest koosnevat süsteemi. Optiline skeem seati üles nii, et esimese paraboolpeegli fookus asuks SI kiu otsal. Kui valgus lähtub paraboolpeegli fookusest, siis peegeldub peeglit kollimeeritud kiirtekimp. Kollimeeritud kiirtekimp koondatakse teise paraboolpeegli PC kiu otsale. Antud meetodiga saavutati maksimaalseks sidustumisefektiivsuseks 0.2%.

Madala sidustumisefektiivsuse põhjuse väljaselgitamiseks asetati CCD kaamera ekraan koondava paraboolpeegli fookusesse saamaks hinnang fookustäpi suurusele. CCD kaameraga tehtud pilt paljastas, et valgus koondus fookuses pindalale $S_1 = 123100 \mu m^2$. LMA-5 kiu südamiku pindala on $S_2 = 20 \mu m^2$. Hinnang teoreetilisele sidustamisefektiivsusele T tuleb $T = \frac{S_2}{S_1} = 0.02\%$. Mõõdetud sidustumisefektiivsus tuleb suurem kui teoreetiline, kuid sidustumisefektiivsuse suurusjärk on peaaegu sama. Seega võib lugeda väikese sidustumisefektiivsuse põhjuseks paraboolpeeglite mitte piisavat täpset justeerimist. Juba ühe paraboolpeegli justeerimine on aeganõudev. Väiksema valguse kõrvalekalle optilise telje sihist või fookuse asukoha nihe põhjustab tuntavaid moonutusi kiirte kollimeerimisel või fokuseerimisel. Kahest paraboolpeeglist koosnevat süsteemi tuleb justeerida seda hoolikamalt, kaamera abiga.

Justeerimisraskused on ületatavad, kui kasutada kahest paraboolpeeglist koosnevat komertsiaalset lahendust [18] tootjalt *NKT Photonics*, milles osad vabad parameetrid on disaini abil välistatud.

5 Tulemuste analüüs ja järeldused

Siin peatükis toome veelkord kokkuvõtlikult välja põhitulemused, mis saadi footonkristallkiu kirjeldamisel ja valguse sidustamisel. Samuti analüüsitakse saadud tulemusi.

1. PCF kaugvälja intensiivsusest väljaarvutatud PCF-i elektromagnetvälja karakterseid parameetrid **3.2** lähevad kooskõlla tootja spetsifikatsioonides välja toodud LMA-5 kiu MFD-ga, milleks on $4.7\ \mu m$. Samuti ühtib saadud parameetritest arvutatud intensiivsuspilt kiu otsal (ehk $z = 0$) J. Repäni töös [14] multipool-meetodiga leitud intensiivsuspildiga.
2. Valguse sidustamisel laserist SIF-i saadi kahe erineva läätsega teoreetilisest efektiivsusest 22% väiksem efektiivsus, mis on aktsepteeritav tulemus, arvestades täppisnihuti mehaanilist täpsust.
3. Valguse sidustamisel astmelise murdumisnäitajaga kiust samatüübilisse astmelise murdumisnäitajaga kiudu oli mõõtmisprotsessi ajal nurk kahe fibri sümmeetriatelje vahel vahemikus 1-4 kraadi. Kui eeldada, et kiudude justeerimisel esines $d_0 = 1.2\ \mu m$ suurune nihe ja $\alpha_0 = 3.4^\circ$ suurune nurk kiudude sümmeetriatelgede vahel, siis teoreetilist ja praktilist sidustumisefektiivsust kirjeldavad jooned joonisel **4.2** ühtivad hästi.
4. Valguse sidustamisel astmelise murdumisnäitajaga kiust footonkristallkiudu oli nurk kiudude sümmeetriatelgede vahel umbes 1 kraad. Üks põhjustest, miks praktiline sidustumisefektiivsus oli väiksem kui teoreetiline, võib olla selles, et ristuvasteljes ehk nn pealtvaates esines mingi nurk kiudude sümmeetriatelgede vahel. Seega kiu eemaldamisel põhjustaks nurk kahe kiu vahel külgsuunalise nihke vastuvõtva kiu keskpunkti ja pealelangeva Gaussi kimbu keskpunkti vahel, mis seletaks erinevust teoreetilise ja praktilise tulemuse vahel. Teine potentsiaalne põhjus, mida ei saa kunagi välistada, on tolmu satumine kiu otstele. Kolmas põhjus võib olla kiudude halb lõikekvaliteet, st et lõige ei ole risti kiu sümmeetriateljega.
5. Kommertsiaalse ühenduse kasutamisel astmelise murdumisnäitajaga kiudude ühendamiseks saadi sidustumisefektiivsuseks 1.5 %. Antud tulemus ei ole rahuldav. Tootja poolt lubatud 0.5 dB suurusele kaole vastab sidustumisefektiivsus $T = 88\%$. Üks põhjustest, miks tulemus oli tootja poolt lubatust oluliselt erinev, võib olla kruviühenduse mehaaniline täpsus. Eelnevas nägime, et kiu otsad peavad olema paari mikronilise täpsusega kohakuti, mida on antud ühenduse abil keeruline saavutada. Teine põhjus võib olla selles, et ühendusse oli sattunud tolmu. Kolmas võimalik põhjus on kiudude kokkupuutumine ühenduskohas, mis võis kiu otsasid lõhkuda. Tõendusmaterjaliks oli fakt, et kiu ühendusest eemaldamise järel ei olnud kiust väljunud valgus enam sümmeetiline Gaussi kimp, vaid täiesti korrapäratu muster.
6. Paraboolpeeglitest koosneva süsteemi kasutamisel saadi maksimaalseks sidustumisefektiivsuseks 0.2%. Madala sidustumisefektiivsuse põhjuse väljaselgitamiseks asetati CCD

kaamera ekraan koondava paraboolpeegli fookusesse saamaks hinnang fookustäpi suurusele. CCD kaameraga tehtud pilt paljastas, et valgus koondus fookuses pindalale, mis oli palju suurem kui südamiku pindalast. Seega võib lugeda väikese sidustumisefektiivsuse põhjuseks paraboolpeeglite mitte piisavat täpset justteeringut.

Kokkuvõte

Käesoleva töös on uuritud teoreetilist ja eksperimentaalset valguse sidustumisefektiivsust, ehk valguse intensiivsuse ülekandumise koefitsienti, optiliste kiudude ühendamisel. Uuriti kolme võimalust:

- kiust kiudu sidustamine
- kiudude ühendamine kommertsiaalse ühenduse abil,
- kiudude ühendamine paraboolpeeglitest koosneva süsteemi abil

Töö alguses sõnastatud eesmärgid täideti: valguse sidustumist suudeti teoreetiliselt ja eksperimentaalselt uurida valguse levimisel nii astmelise murdumisnäitajaga (SI) kiust SI kiudu kui ka valguse levimisel SI kiust footonkristallkiudu (PCF).

Uuriti valguse sidustamist koondava läätsega ühemoodilisse SI kiudu. Kümne millimeetrise fookuskaugusega läätsega suudeti realiseerida 75% teoreetilisest sidustumisefektiivsusest, mis on täiesti rahuldav tulemus.

Uuriti valguse sidustumisefektiivsust samatüübiliste astmelise murdumisnäitajaga kiudude korral, kui üht kiudu teisest sümmeetriajatelje suunas eemale viia. Teoreetilist ja mõõdetud sidustumiskoeffitsienti kirjeldavad graafikud ühtisid küllaltki hästi.

Et välja arvutada teoreetiline sidustumisefektiivsus valguse levimisel astmelise murdumisnäitajaga kiust footonkristallkiudu, määrati eksperimentaalselt 4 parameetrit, mis kirjeldavad footonkristallis levivat valgust. Selleks jäädvustati CCD kaameraga footonkristallkiu kaugvälja intentsiivsuspilt. Töös leiti parim hinnang neljale parameetrile kasutades intentsiivsuspildi lõiget, mida lähendati teoreetilise lõikega. Saadud tulemused olid heas kooskõlas PCF spetsifikatsioonis toodud moodi diameetriga.

Valguse sidustamisel SI kiust PCF-i saadi suurimaks sidustumisefektiivsuseks $T = 50\%$. Eesmärgiks oli uurida sidustumiskoeffitsiendi sõltuvust kiudude vahekaugusest. Paraku teoreetiline sidustumisefektiivsust kirjeldav funktsioon ja mõõdetud väärtused ei sobitunud. Võimalikuks mitesobitumise põhjuseks võis suure tõenäosusega olla footonkristallkiu otsa lõikekvaliteet.

Kommertsiaalse ühenduse kasutamisel saadi astmelise murdumisnäitajaga ühemoodiliste kiudude sidustumisefektiivsuseks 1.5 %. Antud tulemus ei ole rahuldav. Tootja poolt lubatud 0.5 dB suurusele kaole vastab sidustumisefektiivsus $T = 88\%$.

Paraboolpeeglitest koosneva süsteemiga saavutati maksimaalseks sidustumisefektiivsuseks 0.2%. Väikene saavutatud sidustumisefektiivsus on mõistetav, kuna paraboolpeeglite justeerimine nõuab väga suurt täpsust.

Kokkuvõttes leidsime, et ühemoodilisest kiust teise ca $5\mu m$ moodi läbimõõduga kiudu sidustamine on suur väljakutse ja kaod on oodatust suuremad. Võimalikud lahendused sidustamise parandamiseks on:

- kasutada suurema moodiga footonkristallkiude
- kasutada/uurida kommertsisaalset ühendust *NKT photonics*ilt [18]

Summary

This thesis investigates theoretically and experimentally the coupling efficiency between optical fibers of different types. Three connecting options were investigated:

- from fiber to fiber,
- using commercial connections,
- using two parabolic reflectors.

The objectives of the work were accomplished. The coupling efficiency was theoretically and experimentally studied while coupling light from step index fiber (SIF) to the SIF of the same type and while coupling light from SIF to photonic crystal fiber (PCF).

Coupling efficiency of HeNe laser light into the one-mode SIF was investigated. A converging lens with the focal length of 10 mm was used to focus the laser beam onto the tip of the fiber. Seventy five percent of the theoretical coupling efficiency was obtained.

The coupling efficiency between two SIF-s was examined. The coupling efficiency was measured when one of the fibers was pulled away from the other fiber. During the process, the angle between symmetry axes of the fibers remained in the range of 1-4 degrees. It was assumed, that there was a $d_0 = 1.2\mu m$ displacement and $\alpha_0 = 3.4^\circ$ angle between the fibers' symmetry axes. The lines describing the theoretical and practical coupling efficiency were in good agreement.

To calculate the theoretical coupling efficiency describing the propagation of light from SIF to PCF it was necessary to experimentally determine 4 parameters that describe the electromagnetic field propagating in the PCF. This can be done by characterizing the far field emerging from the SIF. These 4 parameters were determined from the PCF's far-field intensity pattern by fitting the intersection of intensity pattern with a theoretical intersection. The electromagnetic intensity obtained from these 4 parameters inside the PCF was in good agreement with the mode-field-diameter given in the LMA-5 PCF specification sheet.

A maximum coupling efficiency of 50% was achieved when coupling light from SIF to PCF. The initial objective was to investigate the coupling efficiency as a function of distance between the fiber ends. However the theoretical line fitted poorly with the experimental results. The non-accordance of the theoretical and measured values can be attributed to fiber termination quality.

Using *ADAFCl Mating Sleeve* to connect two SIF-s resulted 1.5% coupling efficiency. The efficiency in manufacturer's specifications was 88% therefore the obtained result is not satisfactory. After removing fiber from the sleeve, the emerging light intensity pattern was no longer a symmetrical gaussian rather than a completely irregular pattern. One of the possible reasons which may have caused the negative result could be the dust which may have gotten into the sleeve. The other reason might be the physical contact of the fiber ends.

Using two parabolic reflectors to couple light from one SIF to another, a coupling efficiency of 0.2% was obtained. The main reason of the low coupling efficiency was most probably insufficient adjustment of the mirrors. In conclusion, it was found that coupling light from one fiber to another is a great challenge and the power losses are bigger than expected. Possible solutions to improve coupling are:

- using PCF-s with a greater mode field diameter
- using commercial connection from NKT photonics [18]

Kirjandus

- [1] John D. Joannopoulos, Steven G. Johnson, Joshua N. Winn, and Robert D. Meade. *Photonic crystals: Molding the flow of light*. Princeton University Press, second edition, 2008.
- [2] A. Ghatak and K. Thyagarajan *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge University Press, 1998.
- [3] Philip St.J. Russell, *Photonic-Crystal Fibers* Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, 2006.
- [4] P. Piksarv, H. Valtna-Lukner, A. Valdmann, M. Lõhmus, R. Matt, and P. Saari, *Temporal focusing of ultrashort pulsed Bessel beams into Airy–Bessel light bullets*, Opt. Express, vol. 20, no. 15, pp. 3267–3269, 2012.
- [5] “Corning SMF-28 Single-Mode Optical Fiber Product Information”[Online] <http://ece466.groups.et.byu.net/notes/smf28.pdf>, 01.02.2016, 07:14 (UTC)
- [6] C.Sibilia, T.M Benson, M.Marciniak, T.Szoplik *Photonic Crystals: Physics and Technology*, Springer, 2008.
- [7] D. Marcuse, *Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices*, Bell Labs Technical Journal, vol. 56, no. 5, pp. 703-718, 1977
- [8] N. Mortensen and J. Folkenberg, *Near-field to far-field transition of photonic crystal fibers: symmetries and interference phenomena*, Opt. Express, vol. 10, no. 11, pp 475-482, 2002.
- [9] “NKT Photonics LMA-5”[Online] <http://www.nktpotonics.com/wp-content/uploads/2015/01/LMA-5.pdf>, 06.05.2016, 07:14 (UTC)
- [10] Boris T. Kuhlmei, *Theoretical and Numerical Investigation of the Physics of Microstructured Optical Fibres*, PhD thesis, The University of Sydney, June 2004. <http://www.physics.usyd.edu.au/~borisk/physics/thesis.pdf>
- [11] M. C. Teich and B. E. A. Saleh *Fundamentals of photonics*, Wiley Interscience, 1991.
- [12] “Connectors and Splices: Correct Alignment Spells Success”[Online] <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25152>, 06.05.2016, 07:14 (UTC)
- [13] “RP Photonics Encyclopedia”[Online] https://www.rp-photonics.com/fiber_joints.html, 01.02.2016, 07:14 (UTC)
- [14] J. Repän, *Suure numbrilise apertuuriga valgusvälja levimine footonkristallkius*, Tartu Ülikool, 2015.

- [15] J. D. Joannopoulos, Pierre R. Villeneuve, Shanhui Fan , *Photonic crystals: putting a new twist on light*. Review article, Nature, no. 386, pp. 143 - 149, 1997.
<http://www.nature.com/nature/journal/v386/n6621/pdf/386143a0.pdf>
- [16] Christopher A. Edwards, Herman M. Presby, Corrado Dragone, *Ideal Microlenses for Laser to Fiber Coupling* , Opt. Express, vol. 20, no. 15, pp. 3267–3269, 2012.
- [17] Newport: Fiber Optic Basics [Online] <http://www.newport.com/Fiber-Optic-Basics/978863/1033/content.aspx>, 7.04.2016, 07:14 (UTC)
- [18] NKT Photonics: SuperK CONNECT broadband fiber delivery [Online] <http://www.nktphotonics.com/product/superk-connect-broadband-fiber-delivery/> , 26.05.2015, 11:14 (UTC)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Sander Alvin Kelder

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

“SIDUSTUMISEFEKTIIVSUSE EKSPERIMENTAALNE JA TEOREETILINE MÄÄRAMINE ERITÜÜBILISTE OPTILISTE KIUDUDE ÜHENDAMISEL”

mille juhendajateks on Heli Lukner ja Andreas Valdmann

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **27.05.2016**